

Variabilité spatio-temporelle de la teneur en carbone du sol en milieu agricole carbonaté : exemples d'apports de la spectroscopie proche infrarouge.

Spatio-temporal variability of soil carbon content in an agricultural environment with carbonates: examples of contributions of near infrared spectroscopy.

Blavet D.^{1(*)}, Aholoukpé H.², Ouagga T.³, Bensalah N.³, Cheggour A.⁴, Brunet D.¹, Souche G.⁵, Alary K.⁶, Desclaux D.⁷, Gérard F.⁵, Roose E.¹, Simonneaux V.⁸, Brossard M.¹, Hinsinger P.⁵, Sabir M.³, Bernoux M.¹

1. IRD, UMR Eco&Sols - Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & Agroécosystèmes, Montpellier, France.
2. INRAB, Institut National de Recherche Agricole du Bénin, Pobé, Bénin.
3. ENFI, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc.
4. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc.
5. INRA., UMR Eco&Sols - Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & Agroécosystèmes, Montpellier, France.
6. CIRAD, US analyses des eaux, sols et végétaux, Montpellier, France.
7. INRA., UMR DIAPC - Diversité et Adaptation des Plantes Cultivées, Domaine INRA de Melgueil, Mauguio, France.
8. IRD, UMR CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Toulouse, France

(*)Campus Montpellier Supagro, Bâtiment 12, 2 place Viala, F-34060, Montpellier Cedex 2, France. Courriel : didier.blavet@ird.fr.

Résumé / Abstract

La protection efficace des ressources environnementales nécessite une bonne connaissance des variations spatiales et temporelles des propriétés des sols, ainsi que de ses causes et de ses conséquences. Cependant, l'acquisition de données sur cette variabilité nécessite des jeux de données dont l'obtention est limitée par le coût des analyses physico-chimiques, mais aussi, dans certains cas, par la quantité de matériau disponible. Pour les études liées à la séquestration du carbone dans les sols et à leur vulnérabilité aux changements d'usage et aux changements climatiques, des limites supplémentaires apparaissent dans les sols carbonatés, car les formes organiques et inorganiques du carbone doivent être distinguées. Partant de l'hypothèse que la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) pourrait permettre de dépasser ces limites, cette communication présente quelques résultats obtenus avec la SPIR à travers deux exemples d'études en milieu agricole carbonaté, l'un dans le bassin versant de la Rhéraya (Haut-Atlas du Maroc) et l'autre dans la plaine languedocienne (France). Ces exemples montrent notamment que selon le cas étudié et les méthodes physico-chimiques mises en œuvre, une procédure de prédiction par SPIR peut être soit efficace pour prédire le Corg et non efficace pour prédire les carbonates, soit moyennement efficace pour prédire le Corg et très efficace pour prédire les carbonates.

Effective protection of environmental resources requires an understanding of spatial and temporal variation of soil properties, and its causes and its consequences. However, the acquisition of data on this variability requires datasets whose achievement is limited by the cost of physico-chemical analyses, and also in some cases by the amount of material available. For studies related to carbon sequestration in soils and their vulnerability to land use and climate changes, additional limitations appear in carbonate soils as organic forms and inorganic carbon must be distinguished. Assuming that the near-infrared spectroscopy (NIRS) could help overcome these limitations, this paper presents some results obtained with NIRS through two examples of studies in carbonate environment, one in the watershed the Rheraya (High Atlas of Morocco) and the other in the plain of Languedoc (France). These examples show that depending on the particular case studied and physicochemical methods implemented a procedure for prediction by NIRS may be efficient to predict the Corg and inefficient for predicting carbonates or moderately efficient in predicting the Corg and very efficient to predict the carbonates.

Mots clés / Keywords

Carbone organique du sol; Carbonates; Erosion; Occupation du sol; Dioxyde de carbone ; Spectroscopie proche infrarouge.
Soil organic carbon; Carbonates; Erosion; Land Use; Carbon dioxide ; Near infrared spectroscopy.

1. Introduction

La gestion raisonnée et la protection efficace des ressources environnementales nécessitent une bonne connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des propriétés des sols, non seulement parce que le sol fait partie intégrante des ressources environnementales essentielles mais aussi parce que cette ressource sol est en interaction étroite avec les autres composantes biologiques ou biophysiques des écosystèmes. Dans ces interactions, la variabilité des sols peut être la cause mais aussi la conséquence de certains états ou changements d'autres composantes des écosystèmes. Par exemple, des variations spatiales des propriétés bio-physico-chimiques des sols peuvent causer des variations dans le fonctionnement des plantes et des autres organismes du sol, des variations dans l'hydrodynamique des eaux continentales, ou encore des variations dans les échanges gazeux avec l'atmosphère. En retour, les autres composantes des écosystèmes peuvent causer une évolution relativement lente (morpho-pédogenèse) ou rapide des propriétés des sols (par exemple, évolution liée à la végétation et aux pratiques culturales des stocks de carbone, de stabilité des sols, d'infiltrabilité, de vulnérabilité face aux changements climatiques, etc.), évolution qui va à son tour influencer ces autres composantes.

Pour gérer et protéger cette ressource, les agriculteurs ont souvent développé des stratégies traditionnelles qui tiennent compte notamment de la variabilité spatiale et temporelle des propriétés des sols (e.g. [Sabir et al, 2003](#)). Cependant, face aux évolutions techniques et socio-économiques, cette connaissance traditionnelle se perd et/ou devient inadaptée. De nos jours, la recherche expérimentale tente alors d'identifier et de formaliser de nouvelles solutions pour optimiser la gestion et la protection des sols en fonction de leur variabilité (e.g. [King et al, 2007](#)). Mais ceci nécessite l'acquisition d'un nombre de données qui peut être élevé, et qui n'est pas toujours compatible avec les moyens analytiques disponibles. De plus, des propriétés du sol peuvent être plus difficiles à mesurer dans certains types de sol que dans d'autres. Ceci est notamment le cas pour les sols carbonatés où il n'est pas toujours aisé de dissocier la part du carbone organique de celle du carbone inorganique. Il en résulte que l'étude de cette variabilité du sol, pourtant fondamentale, n'est pas systématiquement effectuée dans le cadre des recherches sur la protection des ressources naturelles.

Afin de dépasser ces limitations, certaines recherches visent à développer de nouvelles méthodes d'acquisition rapides et/ou aisées et/ou relativement peu coûteuses de ces données sur les sols (e.g. [Mc Bratney et al, 2003](#)). Parmi celles-ci, des méthodes de spectroscopie appliquées à des échantillons de sol font l'objet de recherches depuis quelques années, plus particulièrement dans le domaine de l'infrarouge auquel des constituants carbonés du sol sont sensibles (e.g. [Chang et al, 2001](#); [Shepherd et Walsh, 2002](#); [Stenberg et al, 2005](#); [Barthes et al 2006](#), [Cozzolino et Moron, 2006](#); [McBratney et al., 2006](#) ; [Brunet et al, 2007](#); [Brunet et al., 2008](#) ; [Zornoza et al, 2008](#); [Wetterlind et al, 2008](#)). Ces méthodes spectroscopiques permettent l'acquisition rapide et non destructive de spectres électromagnétiques de réflectance sur de nombreux échantillons de sol. De plus, si l'analyse de nombreux spectres peut requérir un traitement mathématique complexe, celui-ci n'est plus rédhibitoire grâce aux moyens de calcul couramment disponibles depuis quelques années.

Cependant, le potentiel d'application de ces méthodes spectroscopiques reste à évaluer en fonction de la nature et des propriétés des sols étudiés, et des thèmes de recherche abordés. Or peu de recherches font couramment appel à la spectroscopie IR pour étudier la variabilité temporelle du carbone des sols et les flux de carbone associés, notamment ceux liés aux pertes de C par érosion et minéralisation. Par ailleurs, peu d'auteurs ont encore fait appel à la spectroscopie

infrarouge pour étudier la variabilité spatiale des propriétés du sol, bien que cette tendance commence à s'accroître (e.g. Odlare et al, 2004 ; Gomez et al., 2008 ; Minasny et al., 2009, Cobo et al, 2010 ; Wetterlind et al., 2008 et 2010). Enfin, très peu d'études basées sur la spectroscopie IR ont été menées en milieu carbonaté.

En conséquence, l'objectif de cette communication est de fournir quelques éléments pour contribuer à l'évaluation du potentiel de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) dans certains domaines de recherches liés à la variabilité temporelle et spatiale du carbone organique et inorganique des sols en milieu agricole carbonaté. Pour atteindre cet objectif, nous présenterons quelques résultats d'application de la SPIR réalisées dans ce cadre, à travers des données issues de deux exemples d'études.

2. Matériel et méthode

2.1. Contextes et situations étudiées

Deux études ayant fait appel à des mesures par SPIR sont présentées dans cette communication.

- La première étude a été effectuée dans le bassin versant de l'Oued Rhéraya (grand bassin versant du Tensift), dans le Haut Atlas du Maroc (Roose et al., 2008). Les données recueillies à l'occasion de cette étude ont porté sur l'effet du mode d'occupation du sol sur ses stocks de carbone et sur les transferts de ce carbone par ruissellement-érosion et minéralisation. Ceci s'inscrit dans le contexte plus global d'une série de projets (et notamment des projets en coopération de type Prad puis Corus) qui visent à mieux connaître les modalités et les mécanismes de la séquestration du carbone dans les sols, et les déterminants de leur vulnérabilité face aux changements d'usage ou aux changements climatiques (e.g. Sabir et Roose, 2004 ; Roose et al., 2004 ; Lal, 2005a ; Lal, 2005b ; Bernoux et al., 2005 ; Bernoux et al., 2006 ; Brahim et al., 2010).

Les parcelles étudiées ont été localisées sur un versant près du village d'Asni (environ 45 km au sud de Marrakech, 31°14'N 7°58'W, altitude 1230 m, P~405 mm/an, T°moy~17°C, pente de 25 à 35%), sur un substrat formé d'une coulée basaltique recouvrant des roches carbonatées. L'altération de ce substrat a donné un sol brun vertique argileux (Kastanozem) avec un horizon C calcaire apparaissant à environ 60 cm de profondeur. Trois types d'occupation du sol ont été comparés sur ce versant : i) un matorral à *Juniperus sp.*, *Quercus ilex* et *Camerops humilis*, ii) un matorral dégradé par le parcours d'ovins et de caprins, et iii) une surface cultivée depuis plus de 40 ans occupée par une culture de blé. Différentes observations, mesures et prélèvements ont été effectués in situ pour chaque type d'occupation du sol : simulations de pluies sur 5 placettes de 1 m² (0,6 x 1,65 m) d'intensité = 80 ± 5 mm/h, de durée 30 à 60 min, d'après les caractéristiques des pluies érosives de la région (Cheggour et al., 2008, Simonneaux et al., 2008), avec mesure de la lame ruisselée au cours du temps et récolte des sédiments. Pour chaque placette, des prélèvements ont été effectués à différentes profondeurs du sol (0-1, 0-10, et 15-25 cm) pour mesurer les teneurs en carbone et calculer les stocks de carbone (avec mesure de la densité apparente).

Afin de disposer de quelques données à l'échelle du bassin versant (225 km²), des prélèvements de sédiments ont également été effectués à différentes périodes de l'année, à l'exutoire du bassin de l'Oued Rhéraya, à la station hydrologique de Tahanaout (31°21'N 7°57'W, altitude 925 m, P~350 mm/an, T°moy~19,7°C).

Différentes analyses ont été effectuées au laboratoire (IRD, Montpellier) à partir des échantillons de sol et de sédiments issus des simulations de pluie et des prélèvements dans l'Oued : taux de carbone organique et de carbone total, taux de macro-agrégats stables à l'eau (Ouagga, 2005) et minéralisation potentielle du carbone organique par incubations (Roose et al, 2008). Pour cette minéralisation potentielle, 3x15 g d'échantillons ré-humectés à 60% de leur capacité de rétention en eau ont été mis à incuber à 28°C pendant 28 jours dans des pots de verre étanches, avec des flacons

contenant de la soude destinée à capter le CO₂, (cf notamment [Hamdi, 2010](#) pour un descriptif de ce type de dispositif). La quantité de CO₂ produite durant la minéralisation du carbone du sol a été mesurée par titration de la soude restante le 7ème, 14ème et 28ème jour d'incubation. Ont également été effectuées (et indiquées ici pour mémoire) des mesures de C total et de C organique dissout dans les eaux de ruissellement.

Dans cette étude, deux facteurs ont conduit à l'utilisation de la SPIR : *i)* son caractère non destructif adapté à la faible quantité disponible de matériau pour un certain nombre d'échantillons destinés à des analyses variées, en particulier les sédiments issus de simulations de pluie, et *ii)* la présence de carbonates conduisant à la difficulté de séparer lors des analyses physico-chimiques "classiques" le carbone organique du carbone inorganique issu des carbonates.

- La seconde étude a porté sur la variabilité spatiale des propriétés du sol d'un périmètre d'essais agronomiques situé en Languedoc-Roussillon, au Sud-Est de Montpellier (France). Cette étude a été effectuée au moment de la mise en place d'essais d'agriculture biologique de l'UMR Eco&Sols, dans le cadre d'un programme ANR Systerra (Projet Perfcom dirigé par P. Hinsinger, UMR Eco&Sols, sur les "Peuplements Complexes Performants en agriculture bas intrants - Interactions Multitrophiques et Facilitation Intergénotypique). L'objectif était de disposer de données de base sur la variabilité spatiale des sols pour *i)* comparer l'effet sur le sol de différents mode d'agriculture biologique et conventionnelle, *ii)* mieux interpréter les résultats des essais mis en place et *iii)* mieux raisonner la mise en place d'essais complémentaires (cf. [Aholoukpé, 2009](#) et [Aholoukpé et al., 2010](#)).

Le périmètre étudié, appelé "domaine du Mas-Neuf", occupe 24 ha localisés entre les latitudes 43°37'32"N & 43°37'03"N et les longitudes 3°59'20"E & 3°58'37"E. Il appartient à la station agronomique INRA de Melgueil. Le climat y est typiquement de type méditerranéen, avec un été sec et des averses à caractère orageux en automne (P ~ 600 mm/an, T° moy ~ 14.8 °C.). Situé dans la plaine languedocienne, la pente y est faible (2 à 3 %) mais le ruissellement peut y être non négligeable. Les sols présentent une forte variabilité qui est liée à l'histoire géomorphologique et pédologique de cette plaine ([B.R.G.M., 1969](#) ; [Laporterie et Tamiozzo, 1974](#) ; [Arnal et al, 1983](#)). Ainsi, à l'amont du site (élévation maximale 12 m au dessus du niveau de la mer), on trouve des sols sur mollasses calcaires et épandages caillouteux issu d'un glaciaire fin tertiaire (Pliocène). Ces sols peuvent être de type brun calcaire avec un horizon Bca à précipitations carbonatées à moins de 60 cm, et localement de type brun rouge fersiallitique et décarbonaté ([Augé, 1981](#)). A l'aval (altitude 9 m), on trouve en bordure d'un cours d'eau des alluvions quaternaires récentes (Holocène) qui ont donné naissance à un sol "peu évolué", brun à ocre, non ou peu calcaire, et à hydromorphie de profondeur.

Au cours de la phase de terrain, un maillage systématique a été effectué avec un espacement de 20 mètres, resserré à 10 m dans une zone d'essai agronomique de l'UMR Eco&Sols (cf [figure 1](#)). Ce maillage a fourni 669 points et autant d'échantillons de sol prélevés dans la couche 0-20 cm du sol.

Au laboratoire, la position géographique de ces points a été intégrée dans un système d'information géographique ([Quantum Gis, 2010](#)). D'autres couches d'information ont également été insérées dans ce S.I.G, dont une carte pédologique. Par ailleurs, des analyses physico-chimiques (carbone organique, carbonates, granulométrie, différentes formes de phosphore, etc.) ont été effectuées sur 130 des 669 échantillons répartis sur l'ensemble du périmètre étudié.

Pour cette étude, les deux principaux facteurs qui ont conduit à l'utilisation de la SPIR ont été : *i)* l'intérêt d'obtenir une bonne résolution spatiale de la variabilité des sols, impliquant un nombre élevé de points de mesures et *ii)* la présence de carbonates qui conduit, comme dans le b.v. de la Rhéraya, à une difficulté analytique de séparation du carbone organique et inorganique.

2.2 Estimation des teneurs en carbone par SPIR

2.2.1. Procédure générale de prédiction par SPIR

• Pour les deux études présentées, l'estimation des teneurs en carbone organique et inorganique par spectroscopie proche infrarouge a été effectuée selon la procédure schématisée en [figure 2](#), qui a été développée au sein du laboratoire d'Eco&Sols à Montpellier ([Barthès et al., 2006](#) ; [Brunet et al., 2007](#) ; [Brunet et al., 2008](#)). Au sein de cette procédure, les traitements numériques des données spectrales ont fait notamment appel au logiciel Winisi III-v.1.61e (Foss NIRSystems/Tecator International, LLC, Silver Spring, MD, USA).

- la première étape consiste à tamiser l'ensemble des échantillons à 2 mm.

- la seconde étape est l'acquisition de spectres proche infrarouge sur un ensemble X d'échantillons suivie d'un prétraitement numérique de ces spectres. Cette étape se subdivise elle-même comme suit : *i)* On mesure sur des échantillons de 5 à 10 g de réflectance diffuse dans le proche infrarouge entre 1100 et 2500 nanomètres de longueur d'onde avec un spectrophotomètre Foss NIR Systems 5000. Avec une valeur de réflectance tous les 2 nanomètres, cette phase fournit pour chaque échantillon un spectre constitué de 700 variables de réflectance. *ii)* Les valeurs de réflectance sont transformées en absorbance qui est le logarithme de l'inverse de la réflectance ($\log(1/R)$). *iii)* Afin d'améliorer le signal, différents prétraitements sont appliqués afin de normaliser et de réduire les variations d'intensité des spectres dues, notamment, à l'effet de la taille des particules et au bruit de fond de l'appareil. Ils sont le plus souvent associés à une dérivée qui permet de mettre en exergue certaines caractéristiques spectrales. *iv)* Une ACP effectuée sur l'ensemble de la population permet d'identifier les spectres aberrants (outliers) qui sont ainsi éliminés de la construction des modèles.

- la troisième étape établit des modèles de prédictions par SPIR pour les propriétés du sol (ici C organique et C des carbonates) et identifie les modèles les plus efficaces. Le nombre d'échantillons des sets d'étalonnage et de validation est fixé par l'utilisateur. Une régression (modifiée) des moindres carrés partiels (mPLS) est effectuée afin de corréliser les valeurs spectrales avec les teneurs des constituants à prédire. Au cours de cette étape, les échantillons les plus représentatifs spectralement de la population étudiée peuvent être sélectionnés par le logiciel pour constituer le set d'étalonnage et des échantillons sont choisis au hasard pour établir le set de validation (le set d'étalonnage de la station de Melgueil a cependant été sélectionné selon des critères différents, cf. § 2.2.2). L'équation d'étalonnage obtenue fournit l'erreur standard d'étalonnage (SEC), l'erreur standard de la validation croisée (SECV) et son coefficient de détermination (R^2_{cal}) fournis par l'application d'une validation croisée. Le RPD (ratio performance deviation ou ratio écart-type/SECV) est également calculé. Ces paramètres permettent d'évaluer la qualité d'un modèle. La robustesse de celui-ci est ensuite estimée sur le set de validation avec l'erreur standard de prédiction (SEP) et son coefficient de détermination (R^2_{val}).

Enfin, la dernière étape est l'application du modèle sur les constituants à prédire de la population restante.

2.2.2 Application de la procédure aux exemples étudiés

• Pour l'étude dans le bassin versant de la Rhéraya, 166 échantillons tamisés à 2 mm ont fait l'objet d'acquisition de spectres proche infrarouge.

Les modèles de prédiction par SPIR ont été établis à partir de 80 de ces échantillons pour lesquels des dosages de carbone organique ont été effectués ([Ouagga, 2005](#)). Ces 80 échantillons regroupent *i)* 55 échantillons de sol prélevés en 2004 principalement à Asni sous matorral, matorral dégradé et culture à différentes profondeurs (0-1 cm, 0-10 cm, 15-25 cm ou 20-30 cm) , *ii)* 12 échantillons de sédiments issus d'une première série de 7 simulations de pluie effectuées à Asni sous matorral, matorral dégradé et culture en octobre 2004, et *iii)* 13 échantillons de sédiments prélevés dans l'oued Rhéraya à Tahanaout à différentes périodes (de 2003 à 2004) ([Roose et al, 2008](#)). Après élimination

d'outliers spectraux, 55 de ces échantillons ont été utilisés pour calibrer les modèles de prédiction par NIRS, et 18 pour les valider. Sur cette même série d'échantillons, le carbone total et le carbone organique ont été dosés par combustion et analyse élémentaire CHN (laboratoire d'analyses de l'IRD Montpellier). Pour le carbone organique, nous avons procédé au préalable à la décarbonatation des échantillons par adjonction à une suspension de sol en milieu aqueux d'HCl 1/2 au goutte à goutte, jusqu'à disparition de l'effervescence produite par HCl. Le carbone des carbonates a ensuite été estimé par différence entre Ctotal et Corg.

Les 86 autres échantillons ont regroupé i) 60 échantillons de sol prélevés à Asni sous matorral, matorral dégradé et culture (0-1 cm, 0-10 cm, 15-25 cm ou 20-30 cm), ii) 6 échantillons issus d'un profil jusqu'à 110 cm sous matorral, iii) 3 échantillons issus d'une ravine sur le site d'Asni, iv) 7 échantillons de sédiments issus d'une série complémentaire de simulations de pluie effectuées à Asni en avril 2005 sous matorral, matorral dégradé et culture, et enfin v) 10 échantillons de sédiments prélevés dans l'Oued Rhéraya à Tahanaout en 2004 et 2005.

Les données prédites par SPIR ont ensuite été mises en relation, à l'aide d'une base de données relationnelle, avec d'autres données obtenues sur le site telles que i) la stabilité des agrégats (Ouagga, 2005) estimée selon la méthode de Kemper et Rosenau (1986), ii) la densité apparente, iii) les pertes en terre sous pluies simulées (Ouagga, 2005, Cheggour et al., 2008, Simonneaux et al., 2008, Roose et al, 2008) et iv) le potentiel de minéralisation des sols (Ouagga, 2005, Roose et al., 2008).

- Pour l'étude du périmètre d'essais agronomiques de la station INRA de Melgueil, les 669 échantillons prélevés sur la maille systématique (cf. figure 1) ont été tamisés à 2 mm, et ont fait l'objet d'acquisition de spectres infrarouge (Aholoukpé, 2009 ; Aholoukpé et al, 2010). Les modèles de prédictions par SPIR ont été établis avec une sous-population de 130 échantillons, répartis sur l'ensemble du périmètre étudié, et pour lesquels des analyses physico-chimiques ont été effectuées. 100 d'entre eux ont servi à l'étalonnage des modèles de prédiction par SPIR (69 échantillons localisés en maille spatiale oblique de 56 mètres + 19 échantillons complémentaires choisis selon les caractéristiques pédologiques du site + 12 échantillons choisis dans la zone d'essai agronomique de l'UMR). Les 30 autres échantillons, obtenus par tirage aléatoire sur les 569 échantillons restants, ont servi à la validation des modèles de prédiction. Les données prédites par SPIR ont ensuite fait l'objet de différentes analyses spatiales, dont des analyses géostatistiques, des interpolations par krigeage (logiciel Surfer) et des corrélations spatiales avec d'autres données (logiciels QGis et environnement statistique R).

3. Résultats et discussion

3.1 Efficience de la prédiction des teneurs en C par spectroscopie proche infrarouge

Suivant Chang et al (2001) un étalonnage est considéré comme bon si R^2_{cal} est significatif et proche de 1 avec un RPD > 2, moyenne pour $1.4 < RPD < 2$ et mauvais si $RPD < 1.4$. De même, la validation d'un modèle est correcte si R^2_{cal} est significatif et proche de 1. En conséquence, et ainsi que le montre le tableau 1, dans le cas d'échantillons du B.V. de la Rhéraya, les modèles les plus efficaces établis par l'analyse de spectres proche infrarouge ont i) correctement prédit les teneurs en C organique (ratio performance deviation RPD ≥ 2 ; $R^2_{val} \sim 0.9$; $R^2_{val} \sim 0.79$ significatifs à $p = 0.01$) et ii) mal prédit les teneurs en carbonates (RPD < 2 et R^2_{val} non significatif). La figure 3 permet de visualiser la relation entre Corg mesuré et Corg prédit.

Dans le cas des échantillons de la station de Melgueil, on observe une tendance inverse (cf. tableau 1) : les modèles les plus efficaces établis par analyse des spectres proche infrarouge ont i) très bien prédit les teneurs en Carbonate (RPD proche de 6, R^2_{cal} et $R^2_{val} > 0.9$ et significatifs à $p = 0.01$) et ii) moins bien prédit les teneurs en C organique (RPD < 2, $R^2_{val} \sim 0.57$).

Cette inversion de tendance d'une situation à l'autre dans la qualité de prédiction par SPIR des

teneurs en C des carbonates et en Corg pourrait s'expliquer notamment par les différences de méthodes d'analyses physico-chimiques employées. En effet, dans le cas du BV de la Rhéraya, le dosage du carbone organique a été effectué directement (après décarbonatation des échantillons) et les teneurs en carbone des carbonates ont été déduites par le calcul de la différence entre teneur en carbone total et teneur en carbone organique. A l'inverse, dans le cas des échantillons de la station de Melgueil, le dosage des carbonates a été effectué directement, et les teneurs en matière organique ont été déduites par le calcul de la différence entre teneur en carbone total et teneur en carbone des carbonates. D'autres éléments liés à la gamme de variation existante pour effectuer les étalonnages par SPIR peuvent aussi intervenir, en particulier le fait que les teneurs en carbonates sont en moyenne plus faibles et moins variables dans le cas des échantillons du BV de la Rhéraya que dans le cas des échantillons de la station de Melgueil (cf. valeurs respectives dans les colonnes Mean et SD du [tableau 1](#)).

Site et type d'échantillons	Propriétés estimées par NIRS	Pré-traitement spectral optimal	Paramètres d'étalonnage SPIR (selon prétraitement spectral optimal)							Paramètres de Validation SPIR		
			N1	Mean	SD	SEC	SECV	RPD	R ² cal	N2	SEP	R ² val
Maroc, Ht Atlas Bassin Versant de la Rhéraya, Asni et Tahanaout / (sol 0-1 et 0-10 cm + sédiments de	Carbonates (eq. CaCO ₃)	SNVD II-441	43	26.9	15.4	11.5	12.7	1.2	0.45***	18	28.0	0.005 ns
France, Plaine Languedocienne Station expérimentale INRA de Melgueil / (sol 0-20 cm)	Carbonates (eq. CaCO ₃)	SNV II-441	90	43.4	68.2	6.0	11.4	6.0	0.99***	30	36.6	0,94***

Abréviations : SNV = standard normal variate ; D = Detrend ; SdtMSC = standard multiplicative scatter correction. Dans le pré-traitement spectral, les chiffres romains correspondent à l'ordre de la dérivée (I = ordre 1, II = ordre 2). Les autres chiffres correspondent à des facteurs de lissage des spectres. / SD : standard deviation / SEC : standard error of calibration (erreur standard d'étalonnage) / SECV : standard error of cross validation / RPD : ratio performance deviation (ratio SD/SECV) / R²cal : coeff. de détermination de l'étalonnage = SD²-SEC²/SD² ; / SEP : standard error of prediction / R²val : coeff. de détermination de la validation. / *** = significatif au seuil 0.01 ; ns = non significatif

Tableau 1 : Paramètres de prédiction par SPIR des teneurs en C et N d'échantillons de sol et de sédiments issus du BV. de la Rhéraya (Maroc) et de la station INRA de Melgueil (France).

3.2 Application de la SPIR à la variabilité de propriétés liées au carbone du sol

Nous présentons dans les paragraphes suivants quelques résultats issus des deux études mentionnées dans cette communication, qui s'appuient sur la prédiction par SPIR des teneurs en carbone de la matière organique ou des carbonates, et sa mise en relation avec d'autres données.

3.2.1. Variabilité de la stabilité du sol (étude BV de la Rhéraya)

Ainsi que le montrent le [tableau 2](#) et la [figure 4](#), on peut observer une relation étroite entre les teneurs en C organique prédit par SPIR et la stabilité des agrégats de la couche 0-1 cm du sol, qui est la couche du sol la plus directement soumise à l'énergie des gouttes de pluie et à l'emport par ruissellement diffus. En parallèle des teneurs en C organique, cette stabilité des agrégats varie elle-même fortement selon l'occupation des sols du site étudié ([Ouagga, 2005](#)). Elle constitue, dans les régions soumises à des pluies intenses sur sol sec, un bon indicateur de sensibilité du sol aux risques de ruissellement et d'érosion ([Barthès et al., 1999](#) ; [Barthès et Roose, 2002](#) ; [Le Bissonnais et al., 2007](#), [Bensalah, 2008](#)).

Param 1	Param 2	N	r Pearson
Corg% SPIR	Ag stables > 200 µm en % d'Ag initiaux > 200 µm	21	0.81***
Corg% SPIR	Ag stables > 200 µm en % de sol < 2 mm	21	0.72***
Ag stables > 200 µm en % d'Ag initiaux > 200 µm	Ag stables > 200 µm en % de sol < 2 mm	21	0.96***

Tableau 2. Relation entre Corg prédit par SPIR et agrégats stables > 200 µm (couche 0-1 cm du sol sur Basalte, Asni).

3.2.2. Variabilité des pertes en Corg par érosion hydrique diffuse (étude B.V. de la Rhéraya et autres données)

Les données de Corg du sol prédites par SPIR ont pu également être associées à différentes données issues de simulations de pluie ([Cheggour, 2008](#), [Roose et al., 2008](#)) pour obtenir des bilans de pertes en C organique. Ainsi que le montre le **tableau 3**, on constate alors que les pertes en Corg particulaire, qui constituent la majeure partie des pertes en Corg par érosion hydrique diffuse, sont fortement réduites sous matorral avec litière.

Occupation du sol	Stock COrg 0-30 cm (kg/ha)	Pertes POC/pluie 40mm(kg/ha)	Pertes DOC /pluie 40mm (kg/ha)
Culture (blé)	29 000	27	0,9
Matorral parcours	32 000	26	1,5
Matorral litière	37 000	1	1,4

Tableau 3. Stocks de C, pertes en Corg particulaire (POC) et pertes en Corg soluble (DOC) en fonction de l'occupation du sol (Données Ht Atlas Maroc, sol brun vertique).

Les résultats obtenus à l'aide de la SPIR peuvent aussi contribuer à l'établissement de méta-analyses associant différents résultats expérimentaux sur l'érosion du C. Ainsi, en combinant les résultats de simulations de pluie obtenus dans le B.V de la Rhéraya avec d'autres résultats obtenus selon des simulations de pluie comparables dans la zone viticole méditerranéenne française ([De Noni et al., 2002](#) ; [Blavet et al., 2004](#); [Le Bissonnais et al, 2007](#) ; [Blavet et al, 2009](#)), nous avons pu constater un phénomène a priori non évident (cf. **figure 5**) qui est que plus le stock de Corg de la partie supérieure du sol était faible plus les pertes en Corg étaient fortes. Ceci peut être lié à l'augmentation des pertes en terre et à des phénomènes d'érosion sélective du carbone ([Roose et Barthès, 2005](#)). En définitive, en nous appuyant notamment sur des teneurs en carbone organique prédites par SPIR, nous avons pu déduire de ces résultats que dans les sols à faible stock de Corg, l'érosion du Corg peut s'accélérer au cours du temps.

3.2.3. Variabilité des pertes en C par production de CO₂ (étude BV de la Rhéraya)

Ainsi que le montre la **figure 6**, des résultats d'incubation associés à des prédictions de Corg obtenues par la SPIR révèlent que les pertes en C par production de CO₂ lors d'incubations d'échantillons de sol 28°C sont avant tout liées à la teneur en carbone organique, quelle que soit l'origine du matériau (sol ou sédiment). Ces résultats rejoignent d'autres observations sur le rôle primordial de la quantité de substrat organique pour les micro-organismes et la respiration du sol (e.g. [Hamdi, 2010](#)). Ils suggèrent qu'il serait possible de prédire au moins approximativement le potentiel de production de CO₂ d'un sol ou d'un matériau dérivé à partir de sa teneur en Corg, et donc en définitive à partir des données obtenues par SPIR. Ceci se rapproche des résultats de [Barthès et al. \(2010\)](#), qui prédisent correctement par SPIR le potentiel de dénitrification du sol.

3.2.4. Variabilité spatiale des teneurs en carbonates (étude station de Melgueil)

La [figure 7](#) présente une carte des teneurs en carbonate (en équivalent CaCO_3) de la fraction 0-2 mm de la couche 0-20 cm du sol ([Aholoukpé 2009](#), [Aholoukpé et al, 2010](#)). Cette carte a été obtenue par un krigeage des valeurs prédites par SPIR pour les 669 points de prélèvements présentés dans la [figure 1](#). Elle révèle une bonne correspondance entre la zone à fortes teneurs en carbonates et la zone à affleurement de nodules calcaires qui avait été identifiée lors de la cartographie pédologique antérieure ([Augé, 1981](#)),

La variabilité spatiale des teneurs en carbonates a pu ensuite être mise en corrélation spatiale avec d'autres propriétés liées à la fertilité des sols, également prédites par SPIR. Ainsi par exemple, nous avons pu mettre en évidence sur ce site une relation linéaire inverse statistiquement très significative ($r = -0.81$ pour $n \sim 669$) entre les teneurs en carbonates et les teneurs en Phosphore Olsen ([Aholoukpé, 2009](#)). De telles données peuvent constituer une base de réflexion pour étudier plus finement certains processus géochimiques ([Devau et al, 2009](#)). D'autres corrélations spatiales, non présentées dans cette communication, ont également pu être mises en évidence entre les variations spatiales de comportement d'une culture de blé et les variations spatiales de propriétés du sol prédites par SPIR.

3.2.5. Variabilité spatiale des teneurs en C organique (étude station de Melgueil)

Ainsi que le montre la [figure 8](#), la SPIR permet également, grâce à ses possibilités de multiplication du nombre de points de mesure, d'améliorer la connaissance de la variabilité spatiale de la teneur en Carbone organique. Elle permet en l'occurrence *i)* de révéler, à l'aide d'une analyse géostatistique, l'existence de la structure spatiale de cette variabilité (par mise en évidence dans ce cas d'un modèle sphérique de variabilité dont on peut déterminer la pépité, le palier et la portée), puis *ii)* d'augmenter la résolution spatiale de la cartographie du Corg. Toutefois, compte tenu de la prédiction moyenne dans ce cas du Corg par la SPIR, on se trouve plutôt dans une situation où « étant donné la grande variation des propriétés du sol, beaucoup de mesures à bas prix, même relativement imprécises, peuvent être plus efficaces que quelques mesures précises mais coûteuses » ([Minasny et McBratney, 2002](#)). Il reste donc intéressant, pour ce type de cas, de rechercher une amélioration de la prédiction par SPIR. Celle-ci pourrait peut-être résider dans une autre méthode (plus directe) d'analyse physico-chimique du Corg des échantillons du set d'étalonnage/validation, et/ou dans un affinement de la procédure de prédiction, avec, par exemple, une phase de pré-sélection des longueurs d'onde les plus porteuses de l'information ([Chong et Jung, 2005](#) ; [Cécillon et al., 2008](#)).

4. Conclusion

Les quelques exemples présentés indiquent que la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) et la procédure d'analyse spectrale mise en œuvre peuvent être efficaces pour estimer de manière acceptable et non destructive, et sur des jeux de données importants, les teneurs en carbone organique dans des sols carbonatés ou dans des sédiments dérivés de ces sols. Elle peut ainsi contribuer à l'étude de la variabilité spatio-temporelle du carbone organique dans ces sols, et de ses causes et conséquences, dont celles liées aux transferts de carbone par l'érosion ou par les processus de séquestration/minéralisation.

Ces exemples indiquent toutefois une diversité de la qualité des modèles de prédiction par SPIR des teneurs en carbone inorganique (carbonates). Celle-ci varie *i)* selon la gamme de variation de ces teneurs dans le jeu d'échantillons destiné à calibrer ces modèles et *ii)* selon les méthodes d'analyses physico-chimiques employées pour mesurer ces teneurs (méthodes directes ou indirectes par calcul de différences). Ainsi, à travers les exemples étudiés, il apparaît que la prédiction des teneurs en carbonate n'était pas possible, avec la procédure mise en œuvre, lorsque les teneurs en carbonates étaient relativement faibles et peu variables, et qu'elles avaient été mesurées de manière indirecte (cas étudié au Maroc), ou au contraire que la prédiction des teneurs en carbonates était meilleure que

celle des teneurs en carbone organique lorsque les teneurs en carbonates étaient plus élevées, beaucoup plus variables, et mesurées de manière directe (cas étudié en France dans la plaine languedocienne).

La spectroscopie infrarouge s'avère donc intéressante pour l'étude des propriétés des sols, sans avoir probablement encore livré tout son potentiel. Par exemple, pour une prédiction plus systématique des teneurs en carbonates, il pourrait s'avérer intéressant d'étendre la gamme de longueur d'ondes au moyen infrarouge et au visible. On pourrait aussi envisager de développer les méthodes de traitement du signal avec une sélection des longueurs d'onde les plus porteuses d'information.

Il convient en tout cas de noter que l'emploi des méthodes de spectroscopie sur un grand nombre d'échantillons n'implique en aucun cas l'abandon des méthodes d'analyses physico-chimiques "conventionnelles". Les exemples comparés dans cette communication soulignent que la qualité des modèles de prédiction par SPIR doit dépendre aussi de la précision des mesures physico-chimiques de laboratoire effectuées pour calibrer ces modèles. L'emploi de la SPIR est donc en faveur de l'emploi au préalable de méthodes d'analyses physico-chimiques très précises sur un nombre d'échantillons assez limité.

Un des exemples présentés dans cette communication révèle aussi qu'il peut exister une bonne adéquation entre des éléments d'observation issus d'une prospection pédologique classique et des données prédites par SPIR. Les observations pédologiques "classiques" qui contiennent aussi d'autres informations qui ne sont pas directement accessibles à la SPIR en deviennent d'autant plus précieuses.

Enfin, les exemples étudiés indiquent qu'il est préférable de disposer de jeux de données avec une gamme de variation assez importante pour obtenir des modèles robustes de prédiction par SPIR.

Ces considérations soulignent finalement l'intérêt potentiel de disposer de systèmes d'information et de bases de données permettant d'associer des ensembles conséquents de données pédologiques, des données physico-chimiques et des données spectrales afin de produire de nouveaux traitements de l'information (cf. aussi à ce sujet la communication de [Brossard et al, 2011](#) dans le cadre de cet atelier).

5. Remerciements

Nous remercions les coordinateurs des projets Prad, Corus&Aires et ANR PerfCom pour leur soutien financier et les membres de l'ENFI, de l'Université Caddi Ayad de Marrakech, du Cirad, de l'INRA et de l'IRD ayant contribué à ces études.

6. Références

- Aholoukpé H., Blavet D., Souche G., Arnal D., Barthès B., Brunet D., Hinsinger P. - 2010. Variabilité spatiale de la fertilité des sols agricoles en milieu carbonaté méditerranéen : apports de la spectrométrie proche infrarouge. Poster présenté à la journée Héliospir 24-09-2010, Montpellier, France.
- Aholoukpé H. - 2009. Variabilité spatiale du sol et de sa matière organique : étude préalable aux essais d'agriculture biologique. Cas du domaine expérimental de l'INRA à Melgueil/Mauguio, Montpellier . Mémoire de Master 2 USTL Montpellier II, 40 p.
- Arnal H., Bouteyre G., Guichard E., Vigneron J. - 1983. Carte pédologique de France à 1/100 000, feuille Montpellier M22, INRA. ISBN : 2-85340-603-2
- Augé G., 1981. Etude pédologique du domaine INRA de Mauguio. Apports complémentaires de résistivimétrie télédétection et micromorphologie. Mémoire d'Ingénieur agronome ; Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier ; 1-50 pp.
- B.R.G.M. - 1969. Carte géologique au 1/50 000 n° 991 , feuille Lunel, ISBN : 2-7159-1991-3
- Barthès B., Albrecht A., Asseline J., De Noni G., Roose, E. - 1999. Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland, Aveyron, France. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30, 1929–1938.
- Barthès B., Roose E. - 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff & erosion: validation at several levels. Catena 47, 133–49.

- Barthès B. G., Brunet D., Ferrer H., Chotte, J. L., Feller, C.- 2006. Determination of total carbon and nitrogen content in a range of tropical soils using near infrared spectroscopy: influence of replication and sample grinding and drying. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 14. pp 341-348
- Barthès B. G., Brunet D., Brauman A., Fromin N., Lensi R., Volant A., Laclau J. P., Blavet D., Chapuis-Lardy L.- 2010. Determination of potential denitrification in a range of tropical topsoils using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS), *Applied Soil Ecology* 46(1), 81--89.
- Bensalah N. - 2008. Indicateur des risques de ruissellement et d'érosion en vue d'une gestion durable des eaux et des sols (bassin versant du Bou Regreg). Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Rabat.
- Bernoux M., Feller C., Cerri C.C., Eschenbrenner V., Cerri C.E.P. - 2005. Soil carbon sequestration. In: Roose, E., Lal, R., Feller, C., Barthès, B., Stewart, B. (Eds.), *Soil Erosion and Carbon Dynamics*. Adv. Soil Sci. CRC Taylor & Francis Publisher, Boca Raton, USA, pp. 13-22.
- Bernoux M., Cerri C. C., Cerri C. E. P., Siqueira Neto M., Metay, A., Perrin A. S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M. d. C., Pavei M., Milne E - 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review, *Agronomy for Sustainable Development* 26(1), 1-8.
- Blavet D., De Noni G., Le Bissonnais Y., Leonard M., Maillou L., Laurent J.Y., Asseline J., Leprun J.C., Arshad M.A., Roose E. - 2009. Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. *Soil & Tillage Research* 106 (2009) 124-136
- Blavet D., De Noni G., Roose E., Maillou L., Laurent J.Y., Asseline J. -, 2004. Effet des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse* 15 : 111-120.
- Brahim N., Bernoux M., Blavet D., Gallali, T. - 2010. Tunisian soil organic carbon stocks. *International Journal of Soil Science*, vol 5, pp 34-40.
- Brossard M., Le Martret H., Bernoux M., Blavet D., Ettien J.B., Gallali T., Ouedraogo I., Rajaonarivo A., Sabir M. - 2011. Système d'information sol-environnement dédié à la Séquestration du Carbone des sols africains et méditerranéens et à leur vulnérabilité face aux changements climatiques (SiSolC) . Atelier CORUS & AIRES-Sud sur la Protection des Ressources Naturelles, Meknès, Maroc, 14-18 février 2011, 9 p.
- Brunet D., Bernoux M., Barthès B.- 2008. Comparison between prediction of C and N contents in tropical soils using a Vis-NIR spectrometer including a fibre-optic probe versus a NIR spectrometer including a sample transport module. *Biosystems engineering*, vol. 100, no3, pp. 448-45 .
- Brunet D., Barthès B. G., Chotte J. L., Feller C. - 2007. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoderma* 139(1/2), 106-117.
- Cécillon L., Cassagne N., Czarnes S., Gros R., Brun J. J. - 2008. Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts. *Soil Biology & Biochemistry*. 2008. 40: 7, 1975-1979.
- Chang C-W., Laird D. A., Mausbach M. J., Hurburgh C. R. Jr. - 2001 : Near-Infrared Reflectance Spectroscopy-Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:480-490 (2001).
- Cheggour A., Simonneaux V., Sabir M., Roose E. - 2008. Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluie sur les principaux sols du bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc), In : Roose Eric (dir.), Albergel Jean (dir.), De Noni Georges (dir.), Laouina A. (dir.), Sabir M. (dir.). *Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides*. Montréal (CAN), Paris (FRA), Paris : AUF, EAC, IRD, 2008, p. 307-311.
- Chong I., Jun C. - 2005. Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 75, 103-112.
- Cobo J. G., Dercon G., Yekeye T., Chapungu L., Kadzere C., Murwira A., Delve R., Cadisch G. - 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. *Geoderma*. 158: 3/4, 398-411.
- Cozzolino D., Moron A., 2006, Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil & Tillage Research*. 2006. 85: 1/2, 78-85. 42 ref.
- De Noni G., Blavet D., Laurent J.Y., Le Bissonnais Y., Asseline J. - 2002. Proposal of soil indicators for spatial analysis of carbon stocks evolution. In: IUSS (Eds.), *Soil Science: Confronting New Realities in the 21st Century*. Transactions of the 17th World Congress of Soil Science. 14-21 August 2002, Bangkok, Thailand Paper 1783, 13 pp. Available on line by <http://hal.ird.fr/ird-00278334/fr/> (checked on 12.05.08).
- Devau N., Le Cadre E., Hinsinger P., Jaillard B., Gérard, F. - 2009. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: experimental and mechanistic modelling approaches. *Applied Geochemistry* 24(11), 2163-2174.
- Gomez C., Viscarra Rossel R.A., Mc Bratney A.. - 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy; an Australian case study. *Geoderma* 146(3-4), 403-411.
- Hamdi S. - 2010. Vulnérabilité des services écosystémiques des sols tunisiens face aux changements climatiques régionaux : Sensibilité de la respiration du sol à la température. Thèse de doctorat.

- Kemper W.D., Rosenau R.C., Klute A. - 1986. Aggregate stability and size distribution, Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Amer. Soc. Agron Inc., Madison, USA, 425-442
- King D. - 2007 : Caractérisation spatialisée du milieu physique pour une agriculture de précision. Agriculture de précision ; sciences et technologies. ed Quae ; pp 7-14.
- Lal R. - 2005a. Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world. In "Soil erosion and C dynamics", Roose, Lal, Feller, Barthès, Stewart eds, Advances in Soil Sciences, CRC publisher, USA, 23-36.
- Lal R., 2005b. Soil erosion and carbon dynamics. In: Special Issue, Soil erosion and carbon dynamics. Soil Tillage Res. 81 (2), 137-142.
- Laporterie J.M., Tamiozzo L. - 1974. Carte des sols au 1/5000 de Mauguio, Candillargues, Pointe de la Radelle, Cabanes de Salaison, Lansargues et Valergues, Compagnie Nationale d'aménagement de la region du Bas-Rhône-Languedoc-Nîmes
- Le Bissonnais Y., Blavet D., De Noni G., Laurent J.Y., Asseline J., Chenu C. - 2007. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. Eur. J. Soil Sci. 58 (1), 188-195.
- McBratney, A. B., Minasny, B., Rossel, R. V. - 2006. Spectral soil analysis and inference systems: a powerful combination for solving the soil data crisis., Geoderma 136(1/2), 272-278.
- McBratney A. B., Santos M. L. M., Minasny B. - 2003. On digital soil mapping., Geoderma 117(1/2), 3-52.
- Minasny B., McBratney A. B. - 2002. Soil inference systems. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14-20 August 2002, 1068--.
- Minasny B., McBratney A. B., Pichon L., Wei S., Short M. G. - 2009. Evaluating near infrared spectroscopy for field prediction of soil properties., Australian Journal of Soil Research 47(7), 664-673.
- Odlare M., Svensson K., Pell M. - 2005. Near infrared reflectance spectroscopy for assessment of spatial soil variation in an agricultural field.. Geoderma. 2005. 126: 3/4, 193-202.
- Ouagga T. - 2005. Etude de l'effet des modes d'occupation des sols et de l'érosion sur la séquestration du carbone et l'agrégation des sols dans le bassin versant de la Rheraya (Haut Atlas du Maroc). Mémoire de 3° cycle, ENFI, ingénieur, 82 p.
- Quantum Gis - 2010. Système d'Information Géographique, Projet de l'Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.osgeo.org>
- Roose E., Barthès B. - 2005. Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions. In "Soil erosion and carbon dynamics" Roose, Lal, Feller, Barthès, Stewart eds, Advances in Soil Sciences, CRC publisher, Boca Raton, USA : 55-72.
- Roose E., Blavet D., Sabir M., Ouagga T., Cheggour A., Simonneaux V., Oliver R., Ferrer H., Louri J., Chotte J.L. - 2008. Influence de l'utilisation d'un sol brun vertique sur les stocks de carbone du sol : les risques de ruissellement et d'érosion et le devenir du carbone érodé (bassin de l'oued Rheraya, Haut-Atlas, Maroc). In : Roose Eric (dir.), Albergel Jean (dir.), De Noni Georges (dir.), Laouina A. (dir.), Sabir M. (dir.). Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. Montréal (CAN), Paris (FRA), Paris : AUF, EAC, IRD, 2008, p. 317-324.
- Roose E., De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. - 2004. Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone. 1. Erosion du Carbone. Bull. Réseau Erosion 22, 493p. 2. Séquestration du Carbone et érosion des sols. Bull. Réseau Erosion 23, 636 p.
- Sabir M., Roose E. - 2004. Influences du couvert végétal et des sols sur les stocks de carbone et les risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes méditerranéennes du Rif occidental, Maroc. Bull Réseau Erosion, Montpellier, 23 : 144-154.
- Sabir M., Roose E., Machouri N., Naouri A., 2003. Spatial organization and farmer management of natural resources in two villages in the Rif mountains, Morocco., Organisation spatiale et gestion des ressources et des territoires ruraux. Actes du colloque international, Montpellier, France, 25-27 fevrier, 2003, 1-15.
- Shepherd K.D., Walsh M.G. - 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. Soil Science Society of America Journal, 66, 988-998 pp.
- Simonneaux V., Cheggour A., Sabir M., Roose E. - 2008. Spatialisation de l'érosion dans le bassin versant de la Rheraya (Haut-Atlas, Maroc). Comparaison de simulations de pluies et d'exportation à l'exutoire du bassin. In : Roose Eric (dir.), Albergel Jean (dir.), De Noni Georges (dir.), Laouina A. (dir.), Sabir M. (dir.). Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. Montréal (CAN), Paris (FRA), Paris : AUF, EAC, IRD, 2008, p. 312-316.
- Stenberg B., Jonsson A., Borjesson T. - 2005. Use of near infrared reflectance spectroscopy to predict nitrogen uptake by winter wheat within fields with high variability in organic matter. Plant and Soil. 2005. 269: 1/2, 251-258.
- Wetterlind J., Stenberg B., Jonsson A. - 2008. Near infrared reflectance spectroscopy compared with soil clay and organic matter content for estimating within-field variation in N uptake in cereals. Plant Soil (2008) 302:317-327.
- Wetterlind J., Stenberg B., Soderstrom M. - 2010. Increased sample point density in farm soil mapping by local calibration of visible and near infrared prediction models., Geoderma 156(3/4), 152-160.

Zornoza R., Guerrero C., Mataix-Solera J., Scow KM., Arcenegui V., Mataix-Benevto J. - 2008 : Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. Soil Biology and Biochemistry, Vol. 40, No. 7. (July 2008), pp. 1923-193

Figures

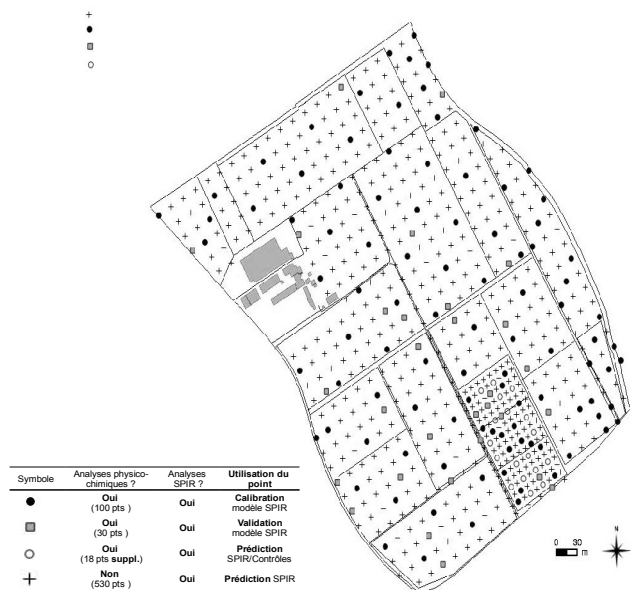


Figure 1. Station INRA de Melgueil, périmètre du Mas-Neuf. Maillage et emplacement de 669 points d'échantillonnage. Echantillons destinés i) à l'étalonnage (calibration) et la validation de modèles de prédiction par SPIR et ii) aux prédictions par ces modèles (projection cartographique Lambert II étendue)

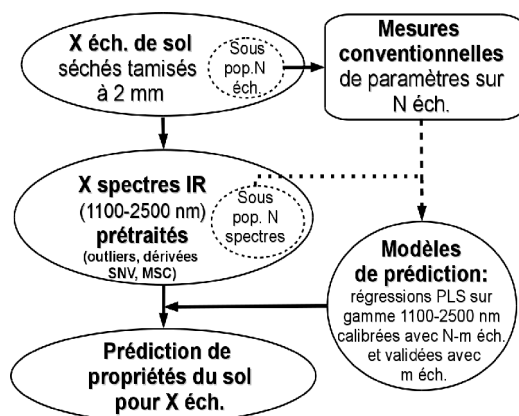


Figure 2. Procédure de prédiction de propriétés du sol par spectroscopie proche infrarouge (SPIR)

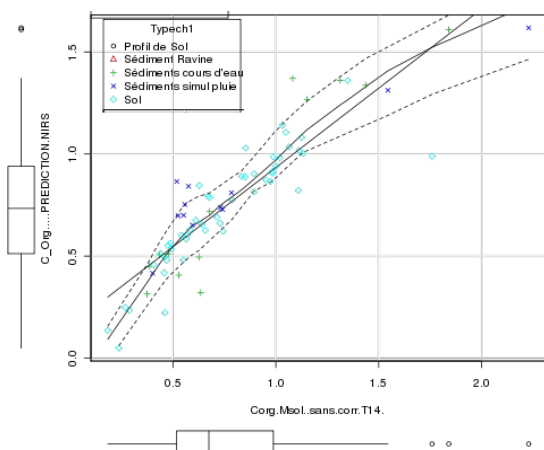


Figure 3. Bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas du Maroc. Corg. mesuré au laboratoire vs. Corg. prédit par SPIR. Echantillons de sol et de sédiments (données en g.100 g⁻¹)

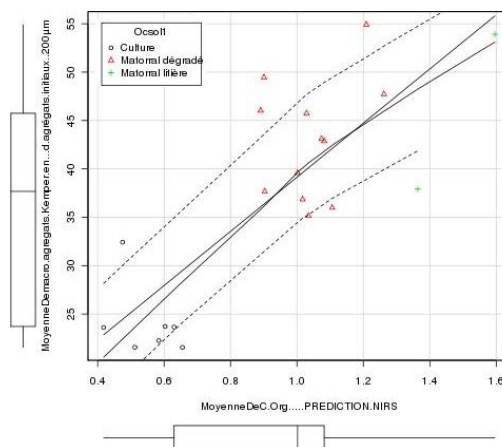


Figure 4. Bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas du Maroc. Relation entre Corg. prédit par SPIR et indice de stabilité des agrégats (*) de la couche 0-1 cm du sol sur basalte Asni, 21 échantillons. (*) = taux agrégats stables > 200 µm / agrégats initiaux > 200 µm, 4 reps de mesure de stabilité)

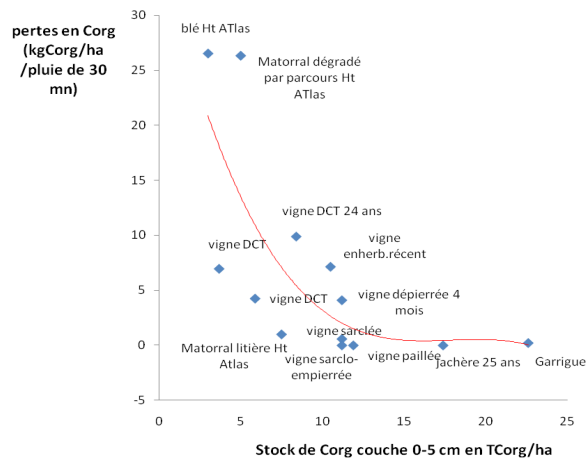


Figure 5. Bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas du Maroc et Languedoc, France. Relation entre stocks de Corg de la couche 0-5 cm et pertes en Corg particulaire par érosion hydrique diffuse (pluies de 60 à 80 mm/h). Graphique associant des données obtenues par SPIR (Haut Atlas du Maroc) et par d'autres méthodes (Haut Atlas du Maroc et Languedoc, France).

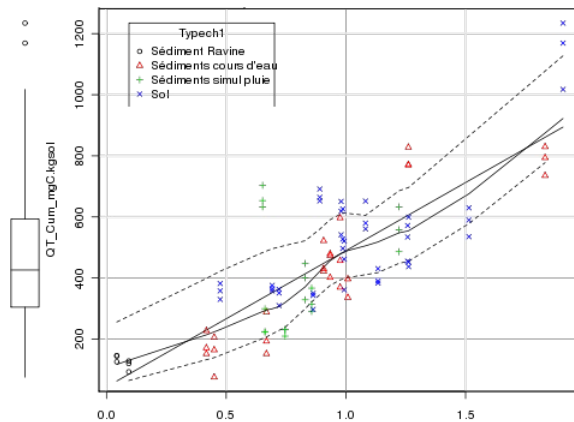


Figure 6. Bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas du Maroc. Pertes en Corg en 28 jours par minéralisation à 28°C d'échantillons de sol et de sédiments en fonction des teneurs en Corg prédites par SPIR. (101 échs avec reps de 3 mesures de minéralisation/éché).

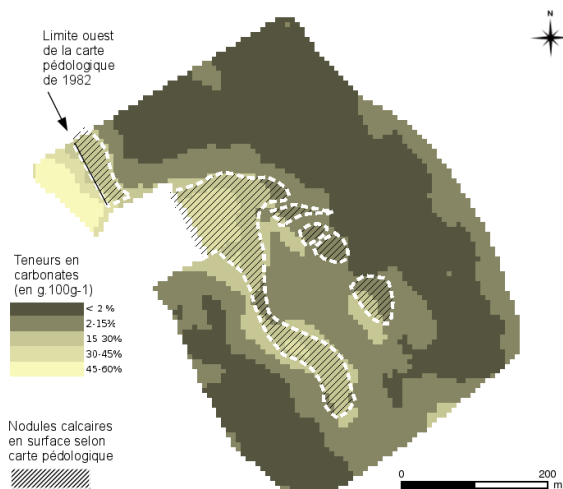


Figure 7. Station INRA de Melgueil, périmètre du Mas-Neuf. Carte des teneurs en carbonates (en équivalents CaCO_3) de la couche 0-20 cm du sol prédites par SPIR (fraction de sol < 2mm, d'après Aholoukpé, 2009 ; Aholoukpé et al., 2010). Superposition sur cette carte de la zone à affleurements de nodules calcaires observée lors d'une cartographie pédologique (Augé, 1981). (projection cartographique Lambert II étendue)

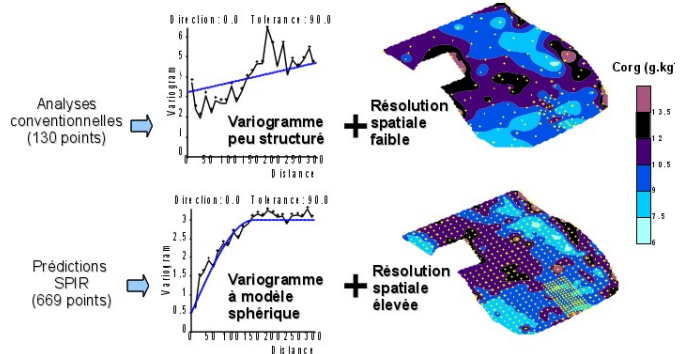


Figure 8. Station INRA de Melgueil, périmètre du Mas-Neuf. Améliorations par SPIR de la connaissance de la variabilité spatiale des teneurs en Corg de la couche 0-20 cm du sol (données 2009, fraction du sol < 2mm) : Apparition d'un variogramme structuré et augmentation de la résolution spatiale de la carte.